

УДК 621.184.5

doi:10.20998/2413-4295.2018.45.09

## ТЕХНОЛОГІЯ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ДИМОВИХ ГАЗІВ З ПІДВИЩЕНИМ ВОЛОГОВІСТОМ ДЛЯ ГАЗОСПОЖИВАЛЬНИХ КОТЛІВ КОМУНАЛЬНОЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

**Н. М. ФІАЛКО, Г. О. ПРЕСІЧ, Г. О. ГНЄДАШ, Р. О. НАВРОДСЬКА\*, М. О. НОВАКІВСЬКИЙ**

Відділ теплофізики енергоефективних теплотехнологій, Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, УКРАЇНА  
\*e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** З метою покращення експлуатаційних та екологічних показників газоспоживаючих котельних комунальної теплоенергетики запропоновано для парових та водогрійних котлів комплексну теплоутилізаційну систему підвищеної теплової і екологічної ефективності з підігріванням та зволоженням дуттьового повітря і нагріванням води на хімводоочищення. За умов реалізації цієї технології, теплоутилізаційна система використовує утилізовану теплоту одночасно для різних потреб котельної установки, що дозволяє забезпечити конденсаційним режим роботи теплоутилізаційного обладнання впродовж всього опалювального періоду. Мета роботи полягає у дослідженні теплофізичних аспектів створення та ефективності застосування запропонованої комплексної теплоутилізаційної системи за умов підвищеного вологовмісту димових газів котлів. Виконано розрахункові дослідження тепловологісних характеристик димових газів і приросту КВТП котла при застосуванні зазначеної комплексної теплоутилізаційної системи, в якій реалізується підігрівання і зволоження дуттьового повітря та нагрівання (або без нього) холодної води на технологічні потреби для різних типів котлів (парового і водогрійного) і відповідних режимів їхньої роботи. Викладено результати досліджень основних характеристик цієї системи в залежності від типу та навантаження котла і проведено їх зрівняння з відповідною системою без нагрівання води системи хімводоочищення. Порівняльний аналіз отриманих даних та зрівняння характеристик теплоутилізаційних систем здійснено за такими параметрами, як: їхня теплопродуктивність  $Q$ , приріст КВТП котла  $\Delta\eta$ , обумовлений їхнім застосуванням, параметри нагрівання та зволоження дуттьового повітря і димових газів після теплоутилізаційної установки. Показано, що дана система забезпечує приріст коефіцієнта використання теплоти палива котла на 11...18 % та скорочення до 60 % викидів оксидів азоту в навколишнє середовище. Також досягається значне зменшення вологовмісту димових газів після теплоутилізаційної установки, отже і втрат теплоти з відхідними газами.

**Ключові слова:** дуттьове повітря; вода хімводоочищення; тепла та екологічна ефективність.

## HEAT-RECOVERY TECHNOLOGY OF EXHAUST GASES WITH HIGH MOISTURE CONTENT FOR GAS-FIRED BOILERS OF MUNICIPAL HEAT-ENERGY

**N. FIALKO, G. PRESICH, G. GNEDASH, R. NAVRODSKA, M. NOVAKIVSKII**

Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies, Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** To improve the operational and environmental performance of steam and water-heating gas-fired boilers, is proposed the efficient technology based on a complex heat-recovery system with heating and humidifying the blown air and heating the cold water of the chemical water-purification system. In terms of the implementation of this technology, the heat-recovery system uses the utilized heat simultaneously for different needs of the boiler plant, this allows the condensation mode of operation of the heat-recovery equipment during the entire heating period. The aim of the work is to study the thermophysical aspects of the creation and operating efficiency of the proposed complex heat-recovery system, provided that the exhaust-gases of the boilers are of high moisture content. Researches of the heat and humidity characteristics of exhaust-gases hath carried out and the increase of the coefficient the use heat of fuel of boiler with the use of this complex heat-recovery system with heating and humidifying the blown air and heating (or without it) of cold water of the chemical water-purification system for various types of boilers (steam and water-heating) and the corresponding modes of their operation. The made comparative analysis of these systems, namely, the comparison data of such characteristics of heat-recovery systems as: their heat capacity  $Q$ , the increase of coefficient the use heat of fuel of boiler  $\Delta\eta$  caused by their use, the heating and humidifying parameters of the blown air and exhaust-gases after the heat-recovery installation. It is shown that for the proposed heat-recovery system in comparison with the corresponding system without the heating of cold water of chemical water-purification system, increases by 1.3 ÷ 1.6 times the general heating capacity of the system and up to 6.6 % rises coefficient the use heat of fuel of boiler. Also, the humidity content of the exhaust-gases is much reduced after the heat-recovery system, and consequently lowered the heat loss with the exhaust-gases.

**Keywords:** blown air; chemical water-purification system; heat and environmental efficiency.

### Вступ

Опалювальні котли комунальної теплоенергетики посідають лідируючу позицію зі споживання природного газу в Україні. Через високу вартість цього виду палива та його відносний дефіцит

у нашій країні таке газоспоживальне устаткування повинно відповідати підвищеним вимогам щодо показників його теплової та екологічної ефективності. Тобто, окрім енергоощадного використання природного газу необхідно дотримуватись

нормативно допустимих концентрацій шкідливих викидів у продуктах згорання, що утворюються при спалюванні природного газу в топці котла. Підвищення теплової ефективності котельних установок реалізується у разі застосування комбінованих теплоутилізаційних систем, в яких шляхом глибокого охолодження відхідних газів відбувається нагрівання теплоносіїв різного призначення. Для покращення екологічних показників котлоагрегатів дієвим є метод зменшення викидів оксидів азоту в навколишнє середовище завдяки пригнічуванню їх утворення в топковому просторі котла при зниженні температури горіння. Зниження вказаної температури може досягатись, зокрема, введенням вологи в зону горіння. При цьому дане введення може реалізовуватись різними способами. Найбільш поширені з них полягають у додаванні води або пари у підвідний повітропровід чи в зону горіння, попередньому зволоженню дуттьового повітря різними шляхами тощо. За умов введення вологи в зону горіння згідно з даними літературних джерел може бути досягнуто значне скорочення викидів оксидів азоту в навколишнє середовище [1,2]. Очевидним є той факт, що зазначене введення вологи призводить до збільшення вологовмісту відхідних газів котлів у порівнянні з традиційними котлами. Це зумовлює підвищення теплових втрат з відхідними газами та посилює конденсацію у газівідвідних каналах котельні, особливо в димовій трубі. Таке явище різко погіршує умови експлуатації газоходів та може викликати швидке їх руйнування.

З метою корисного використання теплових втрат та покращення експлуатаційних показників котельних установок з підвищеним вологовмістом димових газів доцільним є застосування теплоутилізаційних заходів [3-8], зокрема комплексної технології глибокої утилізації теплоти цих газів. За умов реалізації цієї технології в теплоутилізаційних системах використовують утилізовану теплоту одночасно для різних потреб котельної установки [9-11] при забезпеченні в усіх режимах роботи котла поглибленого охолодження димових газів з конденсацією водяної пари, що міститься в цих газах. При використанні ж в комунальній теплоенергетиці традиційних технологій з підігріванням лише одного теплоносія, зазвичай дуттьового повітря або зворотної тепломережної води, реалізується конденсаційний режим роботи теплоутилізаційного устаткування лише за певних режимних характеристик котельної установки, що знижує її загальну теплову ефективність.

Для водогрійних і парових котлів утилізована теплота може також використовуватись для підігрівання холодної води систем хімводоочищення (ХВО) та нагрівання зі зволоженням дуттьового повітря [12]. Таке комплексне використання утилізованої теплоти забезпечить стабільну високу теплову ефективність котла з теплоутилізаційною системою, значне зменшення кінцевого вологовмісту

димових газів та дозволить уникнути необхідності внесення вологи в зону горіння котла від стороннього джерела.

### Мета роботи

Мета роботи полягає у дослідженні ефективності застосування комплексних теплоутилізаційних систем газоспоживальних котельних установок для підігрівання та зволоження дуттьового повітря і нагрівання води на хімводоочищення за умов підвищеного вологовмісту їхніх димових газів.

### Викладення основного матеріалу

Схема комплексної теплоутилізаційної системи з підігріванням і зволоженням дуттьового повітря та нагріванням холодної води ХВО наведена на рис. 1.

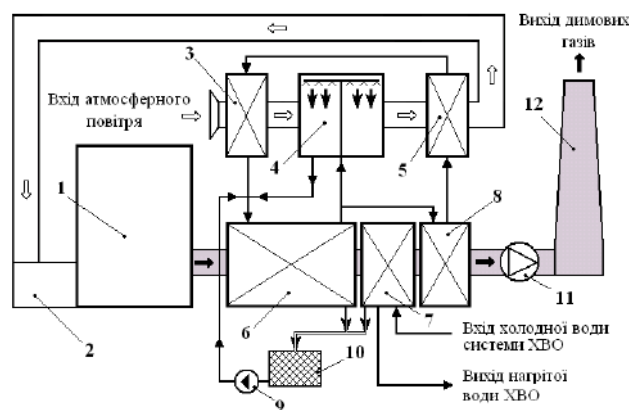


Рис. 1 – Принципова схема комплексної теплоутилізаційної системи для підігрівання і зволоження дуттьового повітря та підігрівання холодної води системи хімводоочищення:

1 – водогрійний чи паровий котел; 2 – газопальниковий пристрій; 3 – повітрянагрівач; 4 – контактний повітрянодігрівач; 5 – повітряродогрівач; 6 – водопідігрівач; 7 – водопідігрівач холодної води системи ХВО; 8 – газопідігрівач; 9 – водяний насос циркуляційного контуру системи; 10 – нейтралізатор конденсату; 11 – димосос; 12 – димова труба

В даній системі відносно сухе атмосферне повітря з навколишнього середовища надходить до повітрянагрівача 3, де частково підігрівается, потім спрямовується до контактного теплообмінника 4, у якому одночасно відбуваються процеси зволоження і підігрівання дуттьового повітря водою, нагрітою у поверхневому теплообміннику 6 за рахунок утилізації теплоти відхідних димових газів котла.

Вологе та нагріте повітря для попередження випадіння конденсату у повітропроводі додатково підігрівается у повітряродогрівачі 5 після чого відводиться з теплоутилізаційної установки і надходить до газопальникового пристрою 2 котельного агрегата 1.

Інша частина утилізованої теплоенергії даної комплексної системи використовується для хімводоочищення шляхом нагрівання вхідної

холодної води у водогрійному теплообміннику 7, встановленому за ходом газів після водогрійного теплоутилізатора 6.

У теплообмінниках 6 та 7 реалізується конденсаційний режим роботи. Утворений з димових газів кислий конденсат стікає у нейтралізатор 10, де змінюється його водневий показник рН до нейтрального, після чого цей конденсат може бути використаний у водяному циркуляційному контурі теплоутилізаційної системи.

Димові гази після вказаних теплообмінників підсушуються у газопідігрівачі 8 шляхом їхнього підігрівання до рівня, що дозволяє запобігти конденсатоутворення у газовідвідних каналах котельної установки. Підсушені димові гази завдяки димососу 11 залишають теплоутилізаційну установку і видаляються в навколишнє середовище через димову трубу 12.

В роботі для різних типів котлів (парового та водогрійного) і відповідних режимів їхньої роботи виконано дослідження тепловолігісних характеристик димових газів та приросту коефіцієнта використання теплоти палива (КВТП) котла при застосуванні комплексної теплоутилізаційної системи з підігріванням і зволоженням дуттьового повітря та нагріванням холодної води ХВО і відповідної системи без нагрівання води ХВО. Проведено порівняльний аналіз даних систем шляхом зіставлення таких характеристик як: теплопродуктивність  $Q$ , приріст КВТП котла  $\Delta\eta$ , зумовлений їхнім застосуванням, параметри нагріваного та зволоженого дуттьового повітря і димових газів після теплоутилізаційної установки. Вихідні дані для проведення досліджень наведено в табл.1.

При цьому для водогрійного котла дослідження проведені в широкому діапазоні зміни його навантаження, який відповідає роботі котла при дотриманні температурного графіка котельні, а для парового – розглянуто два режими роботи за регламентом, а саме 100 та 50 %.

Щодо нагрівання в комплексних теплоутилізаційних системах з паровим або водогрійним котлом води системи хімводоочищення, то її витрати згідно з нормами підживлення теплових мереж приймалися у розмірі 1,5 % від загальної витрати котлової води водогрійного котла.

При проведенні розрахункових досліджень враховувались особливості теплового розрахунку котла з теплоутилізаційною системою в умовах глибокого охолодження димових газів. Основні особливості цього розрахунку полягають, по-перше, у його проведенні за вищою теплою згоряння палива; по-друге, у складанні теплового балансу котельної установки із врахуванням зміни вологовмісту димових газів в процесі тепломасообміну і, по-третє, у використанні спеціальних експериментальних залежностей [13] стосовно закономірностей теплообміну при охолодженні димових газів нижче

температури точки роси водяної пари, що міститься в цих газах.

Таблиця 1 – Вихідні дані для теплових розрахунків комплексних теплоутилізаційних систем з підігріванням і зволоженням дуттьового повітря та з нагріванням (або без нього) води на хімводоочищення

Найменування параметра	Тип котлоагрегата		
	Водогрійний	Паровий	
Навантаження котла, %	32...100	50	100
Теплопродуктивність котла, МВт	0,20...0,63	0,32	0,63
Витрата природного газу, м <sup>3</sup> /год	21,5...70,7	34,9	70,7
Витрата димових газів, кг/с	0,14...0,33	0,21	0,33
Температура газів на виході з котла, °С	80...180	154	180
Коефіцієнт надлишку повітря	1,7...1,2	1,5	1,2
Витрата повітря, кг/с	0,12...0,29	0,18	0,29
Вологовміст повітря з навколишнього середовища, г/кг с.п.	0,01...5,00		
Температура води на ХВО, °С	5...10		
Температура навколишнього середовища, °С	-20...10		

### Обговорення результатів

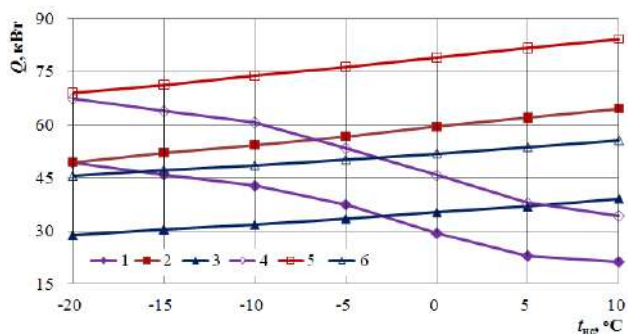
Основні результати досліджень теплоутилізаційних систем для підігрівання і зволоження дуттьового повітря та підігрівання води хімводоочищення або без нього наведено на рис. 2-4.

На рис. 2 подаються дані щодо загальної теплопродуктивності  $Q$  теплоутилізаційних систем, що розглядаються, та величини приросту КВТП котла  $\Delta\eta$  для різних типів котлів і режимів їхньої роботи.

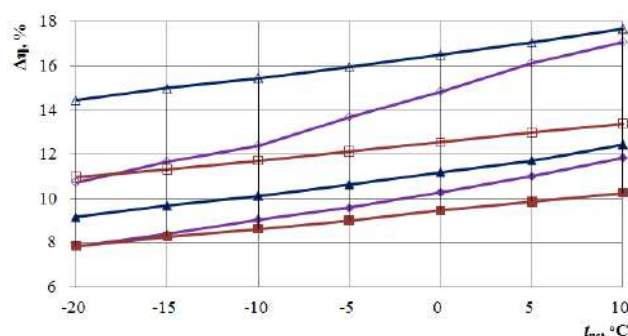
Як видно з рис. 2, а, для водогрійних котлів з підвищенням температури навколишнього середовища теплопродуктивність  $Q$  комплексних теплоутилізаційних систем зменшується.

Це, як очевидно, пов'язано зі зниженням навантаження котла згідно з тепловим графіком котельні, і відповідним зменшенням температури і витрати його відхідних газів. За цих умов є суттєво нижчим рівень нагрівання дуттьового повітря та холодної води для системи хімводоочищення.

Для парових котлів, за умови незмінності їх теплового навантаження при зростанні температури навколишнього середовища  $t_{nc}$ , теплопродуктивність досліджуваних теплоутилізаційних систем дещо зростає, що зумовлено підвищенням температури атмосферного повітря на вході в систему.



а



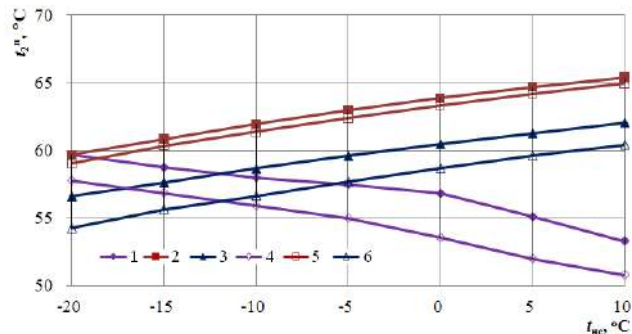
б

Рис. 2 – Залежність від температури навколишнього середовища загальної теплопродуктивності (а) та приросту КВТП (б) комплексних теплоутилізаційних систем з підігріванням і зволоженням дуттьового повітря та за наявності або відсутності нагрівання води на хімводоочищення (ХВО) для водогрійного та парового котлів: 1, 2, 3 – система без нагрівання води ХВО; 4, 5, 6 – система з нагріванням води ХВО; 1, 4 – водогрійний котел; 2, 5 – паровий котел з відносним тепловим навантаженням 100 %; 3, 6 – паровий котел з навантаженням 50 %

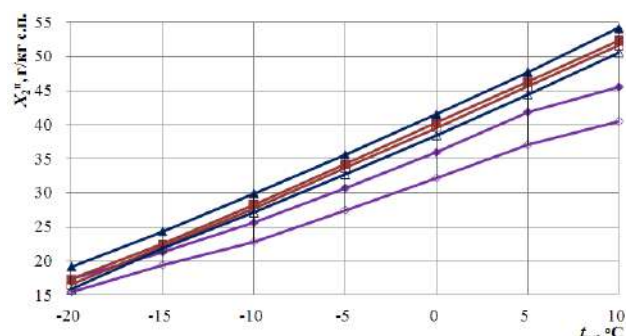
Розрахункові значення теплопродуктивності розглянутих систем за наявності нагрівання води системи хімводоочищення в 1,3...1,6 рази перевищує цей показник для систем без вказаного нагрівання як для водогрійних, так і для парових котлів в усіх розглянутих режимах їхньої роботи.

Як свідчать дані, наведені на рис. 2, б, величина приросту КВТП котла  $\Delta\eta$  за рахунок застосування нових теплоутилізаційних систем є досить значною і становить 8,0...17,7 %. При цьому чим вища температура навколишнього середовища, тим більше значення даного приросту.

У разі використання водогрійного котла, зокрема, оснащеного теплоутилізаційною системою для підігрівання та зволоження дуттьового повітря та нагрівання води на хімводоочищення, зі зростанням величини  $t_{нв}$  від мінус 20 °C до плюс 10 °C приріст КВТП котла збільшується від 10,7 % до 17,0 %. Для відповідної системи без нагрівання води на ХВО за вказаних умов цей приріст менший і становить 7,9...11,6 %.



а



б

Рис. 3 – Залежність від температури навколишнього середовища температури дуттьового повітря (а) та його вологовмісту (б) на виході з комплексних теплоутилізаційних систем з підігріванням і зволоженням дуттьового повітря та за наявності або відсутності нагрівання води на хімводоочищення (ХВО) для водогрійного та парового котлів: 1, 2, 3 – система без нагрівання води ХВО; 4, 5, 6 – система з нагріванням води ХВО; 1, 4 – водогрійний котел; 2, 5 – паровий котел з відносним тепловим навантаженням 100 %; 3, 6 – паровий котел з навантаженням 50 %

Зіставлення значень приросту КВТП котла  $\Delta\eta$  для досліджуваних комплексних теплоутилізаційних систем за наявності або відсутності нагрівання води на хімводоочищення свідчить, що за відсутності нагрівання ці величини є суттєво нижчими. Так для водогрійних котлів з вказаними комплексними системами без нагрівання води на хімводоочищення різниця в приростах КВТП котла може досягати 5,7 %, а для парових котлів при відносному навантаженні 100 % і 50 % – 3,2 % і 5,4 % відповідно.

Результати досліджень, наведені на рис. 3, а, ілюструють залежність рівня підігрівання дуттьового повітря в розглянутих теплоутилізаційних системах від температури навколишнього середовища. Як видно з наведених даних, характер даної залежності корелюється певним чином з відповідною залежністю для теплопродуктивності цих систем (див. рис. 2, а).



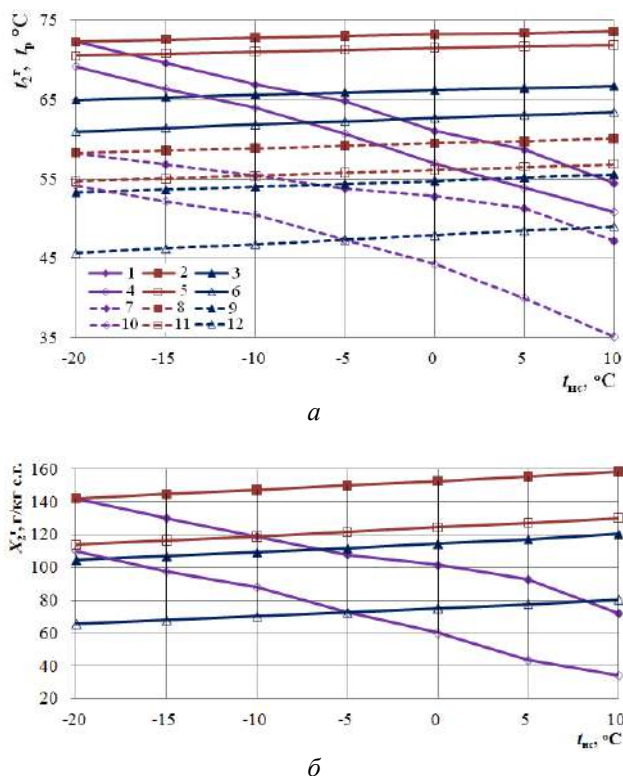


Рис. 4 – Залежність від температури навколишнього середовища температури димових газів (а) та їхнього вологовмісту (б) на виході з комплексних теплоутилізаційних систем з підігріванням і зволоженням дуттьового повітря та за наявності або відсутності нагрівання води на хімводоочищення (ХВО) для водогрійного та парового котлів: 1, 2, 3, 7, 8, 9 – система без нагрівання води ХВО; 4, 5, 6, 10, 11, 12 – система з нагріванням води ХВО; 1, 4, 7, 10 – водогрійний котел; 2, 5, 8, 11 – паровий котел з відносним тепловим навантаженням 100 %; 3, 6, 9, 12 – паровий котел з навантаженням 50 %

А саме, підвищення температури навколишнього середовища  $t_{nc}$  призводить: для водогрійних котлів до зниження кінцевої температури нагріваного повітря, а для парових котлів – до її зростання. Так за наявності нагрівання води системи хімводоочищення температура повітря  $t_2^n$  для водогрійних котлів зменшується з 58 °C до 51 °C, а для парових котлів при відносному навантаженні 100 % збільшується з 59 °C до 65 °C.

Щодо загального рівня температур нагрітого повітря на горіння  $t_2^n$  (після теплоутилізаційних систем), то за умов, що розглядаються, він змінюється в межах 51...65 °C. Відмінність у вказаних рівнях температур для систем з нагріванням води ХВО та без нього є незначною, наприклад, для водогрійних котлів вона не перевищує 2,5 °C, а для парових є ще меншою. При цьому для теплоутилізаційних систем без нагрівання води на хімводоочищення рівень значень температур повітря після системи дещо перевищує даний рівень за наявності вказаного нагрівання. Останнє зумовлено незначним

перерозподілом утилізованої теплоти між елементами системи з підігріванням холодної води на хімводоочищення.

На рис. 3, б наведено результати розрахункових досліджень стосовно рівня вологовмісту дуттьового повітря  $X_2^n$  на виході з теплоутилізаційних систем. Згідно з одержаними даними, для водогрійного і парового котлів при збільшенні температури навколишнього середовища  $t_{nc}$  вологовміст димових газів суттєво зростає.

Так, для парового котла при відносному навантаженні 50 % величина  $X_2^n$  підвищується з 16,0 г/кг с.п. до 51,0 г/кг с.п., тобто відбувається зростання вологовмісту майже у три рази. За інших рівних умов паровим котлам відповідають дещо вищі значення величини вологовмісту  $X_2^n$ , ніж для водогрійних котлів. Порівняння величин вологовмістів  $X_2^n$  для комплексних систем з нагріванням води на ХВО та без нього показує, що в другій ситуації ці величини є дещо більшими.

Тепловологісні характеристики димових газів на виході з досліджуваних комплексних систем наведено на рис. 4. Так на рис. 4, а проілюстровано значення температури димових газів  $t_2^g$  та відповідної точки роси, а на рис. 4, б – величини їхнього вологовмісту  $X_2^g$ . Як видно з рис. 4, а, для систем з нагріванням холодної води хімводоочищення, температура димових газів на виході з системи є нижчою ніж для відповідних систем без такого нагрівання. При цьому для обох систем температура  $t_2^g$  перевищує точку роси водяної пари в димових газах для всіх режимів роботи котла і для систем з підігріванням води ХВО вказане перевищення є більш суттєвим, ніж за його відсутності.

Згідно з даними, наведеними на рис. 4, б, вологовміст димових газів  $X_2^g$  після комплексної теплоутилізаційної системи з підігріванням води на хімводоочищення має менші значення у порівнянні з системою без підігрівання води на хімводоочищення. Вказане пов'язано з високим рівнем конденсації водяної пари саме в теплообміннику для нагрівання холодної води на хімводоочищення.

Щодо екологічного ефекту від застосування пропонованої системи теплоутилізації, то при проведенні її досліджень виконувалось оцінювання відносного зниження  $NO_{x^{bx}}/NO_{x^{bx}}$  викидів оксидів азоту [12]. Встановлено, що завдяки зволоженню дуттьового повітря в котельній установці ці шкідливі викиди зменшуються на 20...60 % в залежності від режиму роботи котла та його типу. При цьому більші значення вказаного зменшення відповідають вищим температурам  $t_{nc}$ , що зумовлено більшим рівнем зволоження дуттьового повітря.

## Висновки

1. Запропоновано схемо-технічне рішення нової комплексної теплоутилізаційної системи з підігріванням та зволоженням дуттьового повітря і нагріванням води на хімводоочищення.

2. Виконано комплекс розрахункових досліджень теплових характеристик пропонованої теплоутилізаційної системи. Показано, що діапазон приросту КВТП котла для даної системи становить від 8,0 до 17,7 %.

3. Проведено порівняльний аналіз тепловологісного режиму та показників ефективності теплоутилізаційної системи з підігріванням і зволоженням дуттьового повітря та нагріванням води хімводоочищення та відповідної системи без такого нагрівання. Показано, що для пропонованої теплоутилізаційної системи у порівнянні з відповідною системою без нагрівання води на хімводоочищення:

- збільшується в 1,3...1,6 рази загальна теплопродуктивність системи та на 6,6 % зростає приріст КВТП котла;

- значно зменшується вологовміст димових газів на виході з системи, а відтак і втрати теплоти з відхідними газами.

4. Застосування комплексних теплоутилізаційних систем зі зволоженням дуттьового повітря для парових і водогрійних котельних установок забезпечує скорочення викидів оксидів азоту на 20...60 % в залежності від навантаження котла.

#### Список літератури

1. Сигал, А. И. Влияние влаги в дутьевом воздухе на эффективность работы котлов промышленной и коммунальной энергетики / А. И. Сигал // *Теплоэнергетика*. – 2004. – № 12. – С. 34-37.
2. Бухаркин, Е. Н. К вопросу об улучшении экологических показателей газоиспользующих установок / Е. Н. Бухаркин // *Промышленная энергетика*. – 2004. – № 6. – С. 40-42.
3. Jeong, K. Analytical modeling of water condensation in condensing heat exchanger / K. Jeong, M. J. Kessen, H. Bilirgen, et. al. // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2010. – № 53. – P. 2361-2368. – doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.004.
4. Jia, L. Effects of water vapor condensation on the convection heat transfer of wet flue gas in vertical tube / L. Jia, X. F. Peng, Y. Yan, et. al. // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2001. – № 44. – P. 4257-4265. – doi: 10.1007/s00231-006-0148-0.
5. Lee, J. Experimental study on the heat and mass transfer of teflon-coated tubes for the latent heat recovery / J. Lee, T. J. Kim, M. H. Kim // *Heat Transfer Eng.* – 2005. – № 26 (2). – P. 28-37. – doi: 10.1080/01457630590897079.
6. Levy, E. Recovery of water from boiler flue gas / E. Levy, H. Bilirgen, K. Jeong, et. al. // *Energy Research Center Lehigh University*. – 2008. – 81 p.
7. Rączka, P. Projektowanie kondensacyjnego wymiennika ciepła odpadowego / P. Rączka, K. Wójs // *Rynek Energii*. – 2014. – № 111. – P. 87-92.
8. Shi, X. An investigation of the performance of compact heat exchanger for latent heat recovery from exhaust flue gases / X. Shi, D. Che, B. Agnew, et. al. // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2011. – № 54. – P. 606-615. – doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.
9. Фялко, Н. М. Комбинированные теплоутилизационные системы котлов с повышенным влагосодержанием

отходящих газов / Н. М. Фялко, Р. А. Навродская, Г. А. Пресич, и др. // *Технологические системы*. – 2016. – № 4 (77). – С. 94-103.

10. Фялко, Н. М. Повышение эффективности котельных установок коммунальной теплоэнергетики путем комбинированного использования теплоты отходящих газов / Н. М. Фялко, Р. А. Навродская, Г. А. Гнедаш, [и др.] // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. – 2014. – № 15. – С. 126-129.
11. Фялко, Н. М. Екологічна ефективність комбінованих систем утилізації теплоти викидних газів котельної установи / Н. М. Фялко, Г. О. Пресіч, Р. О. Навродська, и др. // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка», Теорія і практика будівництва*. – 2013. – № 755. – С. 429-434. <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/22345>.
12. Новаківський, М. О. Комплексні теплоутилізаційні системи для котлів малої та середньої потужності з підвищенням вологовмістом відхідних газів : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.14.06 / НАН України. – К., 2017. – 21 с.
13. Гнедаш, Г. О. Енергоощадні комбіновані водоповітрогрієнні теплоутилізаційні системи для котлів комунальної теплоенергетики : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.14.06 / НАН України. – К., 2014. – 23 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Sigal, A. I. Vliyaniye vlagi v dutyevom vozdukh na effektivnost raboty kotlov promyshlennoy i kommunalnoy energetiki [Effect of moisture in the blown air on the efficiency of the boilers of industrial and municipal energy]. *Teploenergetika [Thermal Engineering]*, 2004, **12**, 34-37.
2. Bukharkin, E. N. K voprosu ob uluchshenii ekologicheskikh pokazateley gazoispolzuyushchikh ustanovok [On the issue of improving the environmental performance of gas-using facilities]. *Promyshlennaya energetika [Industrial power engineering]*, 2004, **6**, 40-42.
3. Jeong, K., Kessen, M. J., Bilirgen, H., et. al. Analytical modeling of water condensation in condensing heat exchanger. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2010, **53**, 2361-2368, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.004.
4. Jia, L., Peng, X. F., Yan, Y. et. al. Effects of water vapor condensation on the convection heat transfer of wet flue gas in vertical tube. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001, **44**, 4257-4265, doi: 10.1007/s00231-006-0148-0.
5. Lee, J., Kim, T. J., Kim, M. H. Experimental study on the heat and mass transfer of teflon-coated tubes for the latent heat recovery. *Heat Transfer Eng.*, 2005, **26** (2), 28-37, doi: 10.1080/01457630590897079.
6. Levy, E., Bilirgen, H., Jeong, K. et. al. Recovery of water from boiler flue gas. *Energy Research Center Lehigh University*, 2008, 81.
7. Rączka, P., Wójs, K. Projektowanie kondensacyjnego wymiennika ciepła odpadowego. *Rynek Energii*, 2014, **111**, 87-92.
8. Shi, X., Che, D., Agnew, B. et. al. An investigation of the performance of compact heat exchanger for latent heat recovery from exhaust flue gases. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2011, **54**, 606-615, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.
9. Fialko, N., Navrodska, R., Presich, G. et. al. Kombinirovannyye teploutilizatsionnyye sistemy kotlov s povyshennym vlagosoderzhaniiem otkhodyashchikh gazov [Combined heat recovery systems of boilers with increased

- moisture content of flue gases]. *Tekhnologicheskiye sistemy [Technological systems]*, 2016, 4 (77), 94-103.
10. **Fialko, N., Navrodska, R., Gnedash, G. et. al.** Povysheniye effektivnosti kotel'nykh ustanovok kommunal'noy teploenergetiki putem kombinirovannogo ispol'zovaniya teploty otkhodyashchikh gazov [Efficiency increase of municipal power boiler-installations system by the combined use of exhaust gases for heating]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Alternativnaya energetika i ekologiya» [International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology]*, 2014, 15, 126-129.
11. **Fialko, N., Presich, G., Navrodska, R., Gnedash, G. et. al.** Ekologichna efektyvnist kombinovanykh system utylizatsiyi teploty vyklynykh haziv kotelnoyi ustanovky [Ecological efficiency of combined heat recovery systems waste of exhaust gases for boiler plant]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politehnika. Teoriya i praktyka budivnytstva [Bulletin of Lviv Polytechnic National University. The theory and practice of construction]*, 2013, 755, 429-434, <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/22345>
12. **Novakivskii, M.** Kompleksni teploutylizatsiyni systemy dlya kotliv maloyi ta serednoyi potuzhnosti z pidvyshchenym volohovnistom vidkhidnykh haziv [Complex heat-utilization systems for low and middle power boilers with increased moisture content of waste gases]. *The thesis for a Degree of "Candidate of Technical Science", specialty 05.14.06 / NAS of Ukraine, Kyiv, 2017, 21.*
13. **Gnedash, G.** Enerhooschadni kombinovani vodopovotrohiyni teploutylizatsiyni systemy dlya kotliv komunalnoy teploenerhetyky [Energy-efficient combined heat recovery water-air heating systems for municipal boilers]. *The thesis for a Degree of "Candidate of Technical Science", specialty 05.14.06 / NAS of Ukraine, Kyiv, 2014, 23.*

### Відомості про авторів (About authors)

**Фіалко Наталія Михайлівна** – доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, заслужений діяч науки і техніки України, Інститут технічної теплофізики НАН України, завідувач відділу теплофізики енергоефективних теплотехнологій; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-0116-7673; e-mail: nmfialko@ukr.net.

**Nataliia Fialko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Head of the Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0116-7673; e-mail: nmfialko@ukr.net.

**Пресіч Георгій Олександрович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут технічної теплофізики НАН України, старший науковий співробітник відділу теплофізики енергоефективних теплотехнологій; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-3728-6490.

**Georgii Presich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Scientific Researcher, Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Senior Scientist of the Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3728-6490.

**Гнедаш Георгій Олександрович** – кандидат технічних наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, старший науковий співробітник відділу теплофізики енергоефективних теплотехнологій; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-0395-9615.

**Georgii Gnedash** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Senior Scientist of the Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0395-9615.

**Навродська Раїса Олександрівна** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут технічної теплофізики НАН України, провідний науковий співробітник відділу теплофізики енергоефективних теплотехнологій; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-7476-2962; e-mail: navrodska-ittf@ukr.net.

**Raisa Navrodska** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Scientific Researcher, Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Presenter Scientific Employee of the Department of Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7476-2962; e-mail: navrodska-ittf@ukr.net.

**Новаківський Максим Олександрович** – кандидат технічних наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, молодший науковий співробітник відділу теплофізики енергоефективних теплотехнологій; м. Київ, Україна.

**Maksim Novakivskii** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Junior Researcher of the Thermophysics of Energy Efficient Heat Technologies Department, Kyiv, Ukraine.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Фіалко, Н. М.** Технологія утилізації теплоти димових газів з підвищеним вологовмістом для газоспоживальних котлів комунальної теплоенергетики / **Н. М. Фіалко, Г. О. Пресіч, Г. О. Гнедаш, Р. О. Навродська, М. О. Новаківський** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 45 (1321). – С. 70-77. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.09.

*Please cite this article as:*

**Fialko, N., Presich, G., Gnedash, G., Navrodska, R., Novakivskii, M.** Heat-recovery technology of exhaust gases with high moisture content for gas-fired boilers of municipal heat-energy. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 45 (1321), 70–77, doi:10.20998/2413-4295.2018.45.09.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Фялко, Н. М.** Технология утилизации теплоты дымовых газов с повышенным влагосодержанием для газопотребляющих котлов коммунальной теплоэнергетики / **Н. М. Фялко, Г. А. Пресич, Г. А. Гнедаш, Р. А. Навродская, М. А. Новаковский** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 70-77. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.09.

**АННОТАЦИЯ** С целью улучшения эксплуатационных и экологических показателей газопотребляющих котельных коммунальной теплоэнергетики предложено для паровых и водогрейных котлов комплексную теплоутилизационную систему повышенной тепловой и экологической эффективности с подогревом и увлажнением дутьевого воздуха и нагревом воды на химводоочистку. В условиях реализации этой технологии, теплоутилизационная система использует утилизированную теплоту одновременно для разных нужд котельной установки. Это позволяет обеспечить конденсационный режим работы теплоутилизационного оборудования в течение всего отопительного периода. Цель работы заключается в исследовании теплофизических аспектов создания и эффективности применения предложенной комплексной теплоутилизационной системы в условиях повышенного влагосодержания дымовых газов котлов. Выполнены расчетные исследования тепловлажностных характеристик дымовых газов и прироста КИТТ котла при применении указанной комплексной теплоутилизационной системы, в которой реализуется подогрев и увлажнение дутьевого воздуха и нагрев (или без него) холодной воды на технологические нужды для различных типов котлов (парового и водогрейного) и соответствующих режимов их работы. Изложены результаты исследований основных характеристик этой системы в зависимости от типа и нагрузки котла и проведены их сопоставления с соответствующей системой без нагрева воды системы химводоочистки. Сравнительный анализ полученных данных и сопоставление характеристик теплоутилизационных систем проведен по таким параметрам, как: их теплопроизводительность  $Q$ , прирост КИТТ котла  $\Delta\eta$ , обусловленный их применением, параметры нагрева и увлажнения дутьевого воздуха и дымовых газов после теплоутилизационной установки. Показано, что данная система обеспечивает прирост коэффициента использования теплоты топлива котла на 11...18 % и сокращение до 60 % выбросов оксидов азота в окружающую среду. Также достигается значительное уменьшение влагосодержания дымовых газов после теплоутилизационной установки, следовательно и потеря теплоты с уходящими газами.

**Ключевые слова:** дутьевой воздух; вода химводоочистки; тепловая и экологическая эффективность.

*Поступила (received) 27.11.2018*